

Institut für Reaktorentwicklung

KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH

des Landes Nordrhein-Westfalen - e. V.

Entwicklungsprobleme eines  
Hochtemperatur-Thorium-Brutreaktors

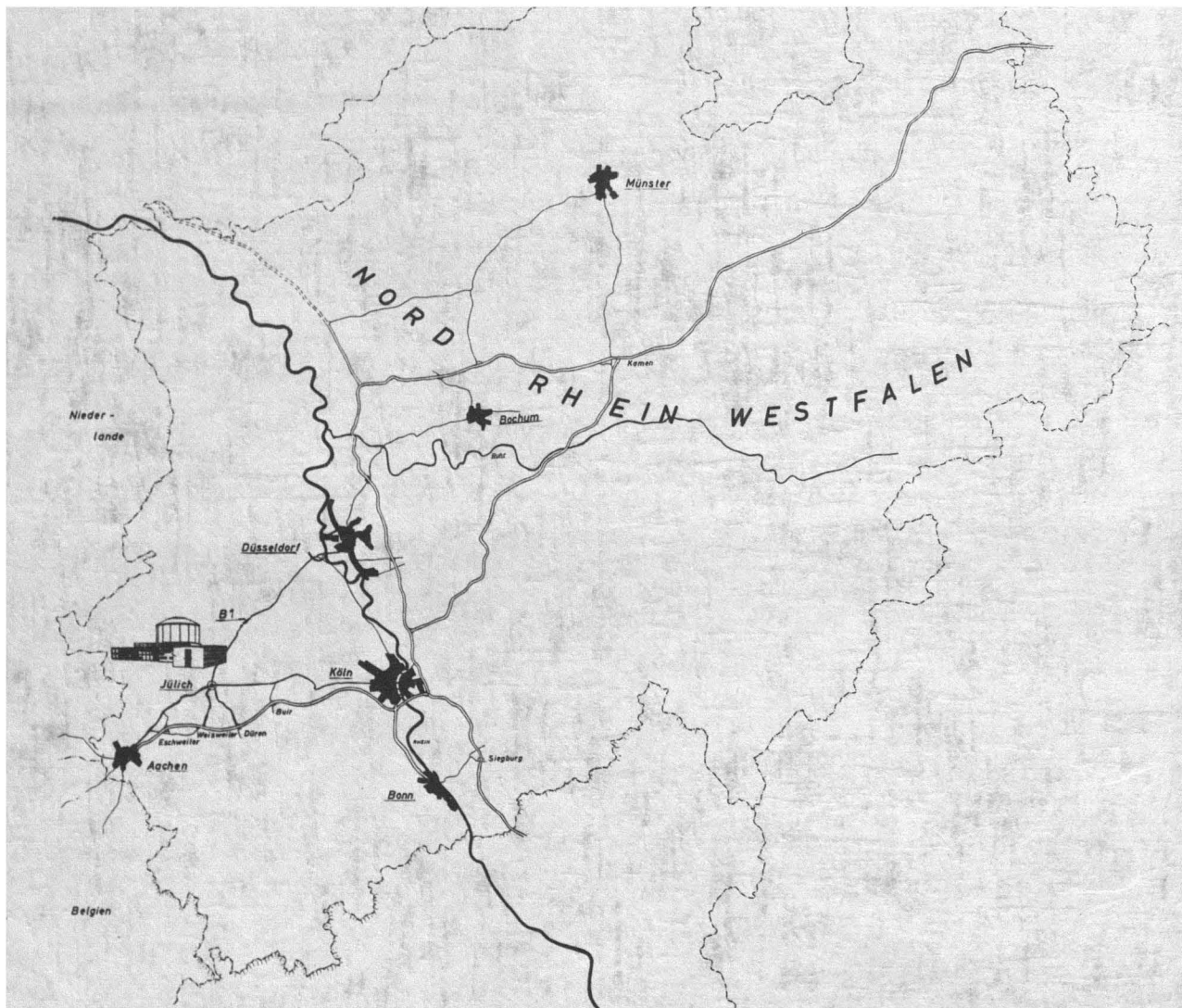
von

R. Hecker

Jül - 382 - RG

September 1966

Als Manuskript gedruckt



# **Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 382**

Institut für Reaktorentwicklung Jül – 382 – RG

Dok.: THORIUM BREEDER REACTORS - DEVELOPMENT  
HIGH - TEMPERATURE REACTORS - DEVELOPMENT  
JÜLICH REACTORS

DK: 621.039.574.3.001.6 : 546.841  
621.039.526.001.6  
621.039.524.46.034.46

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich,  
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

# Entwicklungsprobleme eines Hochtemperatur-Thorium-Brutreaktors

von

R. Hecker

## Zusammenfassung

Die theoretischen Untersuchungen über die Ausnutzung des Thorium-Zyklus in gasgekühlten Hochtemperatur-Reaktoren sind heute so weit gediehen, daß die folgenden Feststellungen getroffen werden können:

- 1) Der Einsatz eines solchen Reaktors als Konverter gestattet die Erzielung sehr wirtschaftlicher Stromgestehungskosten in der nahen Zukunft, aber auch dann noch, wenn die Erzpreise - hervorgerufen durch Verarmung der Reserven bei zunehmender Energiebedarfsdeckung durch Kernenergie - auf mehr als das Dreifache ihres heutigen Wertes ansteigen sollten.
- 2) Der Übergang vom Konverter zum Brüter ist möglich (hinreichende Größe des Reaktors vorausgesetzt). Schon mit einem Hochtemperaturreaktor, dessen Brennelemente nur aus "Schalenkörnern" (Coated Particles) und Graphit bestehen, lassen sich für Einheiten oberhalb 600 MWe und für die in Zusammenhang mit der Verwendung von Schalenkörnern relativ niedrigen Abbrandzustände von 20 000 bis 30 000 MWd/to Brutfaktoren von 1 erreichen, auch dann, wenn kein Brutmantel zur Anwendung gelangt.
- 3) Der Brutfaktor läßt sich durch geeignete Maßnahmen auch über 1 hinaus erhöhen, z.B. durch die Verwendung eines Brutmantels oder dadurch, daß ein Teil oder gar alle Graphitelemente durch solche aus Berylliumoxyd ersetzt werden.
- 4) Die Anwendung von Berylliumoxyd kann in Verbindung mit der möglichen relativ hohen spezifischen Leistung von 2,75 kW/g Spaltstoff - die hier vorausgesetzt wird - bei den obengenannten Abbrandzuständen zu Verdopplungszeiten kleiner als 10 Jahren führen.

Das Hauptproblem einer Weiterentwicklung des Hochtemperatur-Reaktors zum Brüter mit kurzen Verdopplungszeiten besteht neben der Entwicklung geeigneter Methoden für den



Einsatz von Berylliumoxyd darin, die Wiederaufbereitungs- und Refabrikationsverfahren so einfach und so billig zu machen, daß der Brennstoffzyklus trotz des geforderten relativ kleinen Abbrandes von 20 000 bis 30 000 MWd/to noch wirtschaftlich ist. Es werden im folgenden einige der mit einer Weiterentwicklung des "Kugelhaufen-Reaktors" zum "Thermischen Brüter" verbundenen Entwicklungsprobleme aufgezeigt.

## I. Einführung

Die Kernforschungsanlage Jülich des Landes Nordrhein-Westfalen e.V. untersucht im Rahmen einer vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung finanzierten Brüterstudie die Bedingungen, unter denen der Einsatz verschiedener Reaktortypen, die den Thoriumzyklus benutzen, als Brüter wirtschaftlich möglich ist.

Die zu untersuchenden Reaktorsysteme sind:

- 1) Ein schwerwassermoderierter Thoriumbrüter, welcher in Zusammenarbeit der Firma Siemens mit der KFA-Jülich untersucht wird [1];
- 2) ein epithermischer Salzschnmelzenreaktor [2] in Zusammenarbeit mit der Firma INTERATOM;
- 3) ein gasgekühlter Hochtemperatur-Reaktor (Kugelhaufen-Reaktor) [3] in Zusammenarbeit mit der Firma BBC/Krupp Reaktorbau G.m.b.H.

Mit Erwägungen über den letztgenannten Reaktortyp sollen sich die folgenden Ausführungen befassen. Die Entwicklung eines gasgekühlten Hochtemperatur-Thorium-Brüters erscheint hier als die konsequente Fortsetzung derjenigen Entwicklungsrichtung, die mit dem Bau des AVR-Reaktors in Jülich begonnen wurde [4], [5]. Die Brennelemente sind Graphitkugeln, in deren Innerem sich Brennstoff in Form von mit pyrolytischem Kohlenstoff umhüllten Urankarbid- oder Uranoxydteilchen befindet. Als Brutstoff dient ebenfalls pyrolytisch

beschichtetes  $\text{ThC}_2$  oder  $\text{ThO}_2$ . Diese sogenannten "Coated Particles" zeichnen sich auch bei Temperaturen von  $1300^\circ \text{C}$  und höher noch durch ein so ausgezeichnetes Spaltprodukt-rückhaltevermögen aus, daß die Verseuchung des Primärkreislaufes gering ist. Die Brennelemente werden während des Reaktorbetriebes laufend umgewälzt. Dadurch, sowie durch die relativ starke Brennstoffverdünnung, ergeben sich Vorteile, die normalerweise nur bei homogenen Systemen angetroffen werden, so z.B. die ständige Nachfüllung frischer Brennelemente sowie die kontinuierliche Entfernung abgebrannter Elemente aus dem Core ohne Abschalten des Reaktors. Detaillierte Studien und Planungen für den Bau eines 300 MWe-Reaktors nach dem geschilderten Prinzip werden zur Zeit im Rahmen der THTR-Assoziation in Jülich durchgeführt. Der THTR-Reaktor, der als fortgeschrittener Konverter angesprochen werden kann, soll in einem Spannbetonbehälter samt Wärmetauschern und Gebläsen in integrierter Bauweise ausgeführt werden. Helium dient als Kühlgas [3].

Die nunmehr anlaufenden Studien für den Einsatz eines solchen Reaktors als Brüter haben den Vorteil - weil sie keine vollständige Neuentwicklung darstellen - daß sie auf gewonnenen Erfahrungen aufbauen [5].

#### Wichtigkeit billiger Aufbereitungsverfahren und anderer Maßnahmen zur Erzielung billiger Kreislaufkosten

Zwischen dem Abbrandzustand der Brennelemente eines Reaktors und dem über das System gemittelten Konversionsfaktor besteht eine umgekehrte Proportionalität. Vom Standpunkt der Neutronenökonomie und der Schonung der Brennstoffreserven ist es wünschenswert, bei niederen Abbrandzuständen und damit bei hohen Konversionsraten zu arbeiten. Nimmt man die heute in der einschlägigen Literatur geschätzten Erzpreissteigerungen aufgrund der durch zunehmende Energiebedarfsdeckung durch Kernenergie bedingten Verarmung der billigen Erzvorkommnisse als realistisch an - trotz der vielen in solchen Schätzungen liegenden Unsicherheiten - dann besteht die Hauptaufgabe einer Reaktorentwicklung in der Planung von Anlagen mit hohem Konversionsfaktor [6], [7].

Als Nebenbedingung kommt hier aber noch ein wirtschaftliches Moment hinzu, denn die Forderung hoher Konversionsraten bedingt zwangsläufig eine häufigere Aufbereitung, die wirtschaftlich natürlich erst dann vertretbar ist, wenn durch sie die Brennstoffkreislaufkosten reduziert werden. Die Forderung nach hohen Konversionsfaktoren beinhaltet also auch die Notwendigkeit zur Erarbeitung hinreichend billiger Aufbereitungs- und Refabrikationsmethoden. Außerdem ist die Wichtigkeit aller anderen Maßnahmen klar, die den Brennstoffzyklus verbilligen helfen, wie z.B. die Erzielung geringer Verweilzeiten des Brennstoffs außerhalb des Reaktors etc. Hierhin gehören auch alle Maßnahmen, die die Neutronenökonomie eines Reaktors verbessern könnten.

#### Verbesserung der Neutronenökonomie eines Hochtemperatur-Reaktors durch die Verwendung von Berylliumoxyd

Die Verwendung von Berylliumoxyd oder Berylliummetall wird zur Zeit für verschiedene fortgeschrittene Reaktorkonzepte [1], [8], [9] diskutiert. Aufgrund der mit schnellen Neutronen stattfindenden  $(n,2n)$ -Reaktion liefert Beryllium einen positiven Beitrag zur Neutronenökonomie eines Reaktors. Dazu kommen seine ausgezeichneten, dem Graphit vergleichbaren Moderatoreigenschaften. Über die Größe des in thermischen Reaktoren auftretenden Schnellspalteffektes bestehen zur Zeit allerdings aufgrund der ungenauen differentiellen Wirkungsquerschnittsmessungen noch Unsicherheiten. Die berechneten Werte schwanken zwischen  $\epsilon = 1,05$  bis  $1,12$  [10]. Neuere und genauere russische Messungen [11] ergaben jedoch für Berylliumoxyd einen Schnellspaltfaktor von  $\epsilon_{\text{BeO}} = 1,08$ . Dieser relativ hohe Wert gibt Anlaß zu der Annahme, daß durch die Verwendung des Berylliumoxyds eine erhebliche Verbesserung der Neutronenökonomie zu erwarten ist.

Im folgenden seien zwei Tabellen wiedergegeben, in denen die erreichbaren Nettobrutraten für einen Brüter der von uns ins Auge gefaßten Art (Kugelhaufenreaktor) für verschiedene Abbrandzustände aufgezeichnet sind. Tabelle I gilt unter

der Voraussetzung, daß ein Drittel des Moderatorvolumens aus Berylliumoxyd besteht, Tabelle II unter der Voraussetzung, daß die Hälfte des Moderatorvolumens aus Berylliumoxyd besteht. In beiden Fällen ist eine Leistungsdichte von  $7,7 \text{ MW/m}^3$  angenommen, also bei 5600 Kugeln pro  $\text{m}^3$  mit je ca. 0,5 g Uran eine mittlere spezifische Leistung von  $2,75 \text{ kW/g}$ . Ebenfalls in den Tabellen enthalten sind die entsprechenden ungefähren Verdopplungszeiten, die nach der Formel

$$T_D = \frac{\ln 2 \cdot 2,4}{(BR-1) \cdot R} \left\{ 1 + \frac{T_B}{T_W} \right\} \quad (\text{Jahre})$$

berechnet wurden.

Hier bedeutet	R	=	fuel Rating $\frac{\text{kW}_{th}}{\text{g/Brennstoff}}$
	BR	=	Brutrate
	$T_B$	=	Bestrahlungszeit des Elements im Reaktor
	$T_W$	=	out of pile Zeit (hier setzen wir ein Verhältnis $T_B/T_W = 0,1$ voraus in Übereinstimmung mit unseren später noch zu schildernden Zielen)
also	$T_D$	=	$\frac{0,604}{(BR-1)}$

Bei der Berechnung der angenäherten Brutbilanz wurde ein radialer Brutmantel zur Verringerung der Leckage angenommen. Regelverluste brauchen für einen Hochtemperatur-Reaktor der von uns betrachteten Art nicht berücksichtigt werden, da der Reaktor nicht über die Zugabe von Giften geregelt wird.



Tabelle 1

Ein Drittel des Moderatorvolumens besteht aus BeO

Abbrand	10.000 MWd/to	20.000 MWd/to	30.000 MWd/to
$\bar{\eta}$	2,22	2,22	2,22
$\epsilon$	1,025	1,025	1,025 <sup>x)</sup>
$\epsilon \bar{\eta}$	2,27	2,27	2,27
Kettenreaktion	1,000	1,000	1,000
Verluste			
Leackage	0,020	0,020	0,020
Moderator	0,040	0,040	0,040
Sm + Xe <sup>135</sup>	0,050	0,050	0,050
P <sub>a</sub> <sup>233</sup>	0,044	0,044	0,044
Li <sup>6</sup>	0,003	0,006	0,010
U <sup>236</sup>	0,010	0,010	0,010
Andere F.P.	0,020	0,040	0,060
Gesamtverluste	0,187	0,210	0,234
Nettobrutarate	0,083	0,060	0,036
T = Verdopplungszeit	7,3 a	10,1 a	16,8 a

X)

Es wurden die neuen Werte von Zhezherun [11]  $\epsilon = 1,08$  für BeO zugrunde gelegt. Ferner wurde in Übereinstimmung mit Goodjohn und Stewart [12] angenommen, daß dieser Faktor beim Vorliegen von einem Drittel Volumenanteil BeO sich auf 1,025 reduziert, also daß für den Schnellspaltfaktor in diesem Falle gilt:

$$\epsilon_{\text{BeO } 1/3} = 1 + \frac{\text{BeO } 3/3^{-1}}{3}$$

Tabelle II

Die Hälfte des Moderatorvolumens besteht aus BeO

Abbrand	10.000 MWd/to	20.000 MWd/to	30.000 MWd/to
$\bar{\eta}$	2,22	2,22	2,22
$\epsilon$	1,04	1,04	1,04
$\epsilon \bar{\eta}$	2,31	2,31	2,31
Kettenreaktion	1,000	1,000	1,000
Verluste			
Leckage	0,020	0,020	0,020
Moderator	0,040	0,040	0,040
Sm + Xe <sup>135</sup>	0,050	0,050	0,050
Pa <sup>233</sup>	0,044	0,044	0,044
Li <sup>6</sup>	0,003	0,006	0,010
U <sup>236</sup>	0,010	0,010	0,010
Andere F.P.	0,020	0,040	0,060
Gesamtverluste	0,187	0,210	0,234
Nettobrute	0,123	0,100	0,076
T = Verdopplungszeit	4,9 a	6,1 a	8 a

Die in beiden Tabellen angegebenen Werte lassen sich noch etwas verbessern, wenn es gelingt, Li<sup>6</sup> ganz oder teilweise während des Betriebes zu entfernen. Außerdem ist nicht berücksichtigt, daß die Protaktiniumverluste - vermöge der Verwendung von BeO als Moderator mit seinem besseren Bremsvermögen - gegenüber Graphit zurückzugehen.

II. Folgerungen für den Brennstoffzyklus eines THTR,  
der als Brüter betrieben werden soll.      Arbeitsvorschlag

Wie aus dem Vorangehenden entnommen werden kann, betreffen die Entwicklungsarbeiten, die die Ermöglichung des Brütens bei einem Kugelhaufen-Reaktor hinreichender Größe zum Ziele haben, in erster Linie das Brennelement selbst sowie den Brennstoffkreislauf und weniger die Probleme, die mit der ingenieurmäßigen Auslegung des Reaktors zu tun haben.

Bei einem Kugelhaufen-Reaktor mit seinen ständig umgewälzten Brennelementen bietet sich der Gedanke an - ähnlich wie dies z.B. für homogene Reaktoren mit zirkulierendem Brennstoff vorgeschlagen wurde [13] - nach der Möglichkeit zur Anwendung eines quasi kontinuierlichen Aufbereitungsverfahrens zu suchen, welches den abgebrannten Brennstoff nach möglichst kurzen Kühlzeiten verarbeitet und dann an den Reaktorkreislauf zurückgibt. Die benutzten Kugелеlemente sollten dabei möglichst wiederverwendet werden. Das Verfahren muß neben der Forderung nach größter Schnelligkeit - wegen der Verringerung der notwendigen Reservehaltung - gleichzeitig der Forderung nach größter Billigkeit entsprechen.

Um nun ein der "kontinuierlichen Aufbereitung" nahekommendes Verfahren auch für die kugelförmigen Brennelemente eines THTR zu verwirklichen, schlagen wir hier ein Verfahren zur Erprobung vor, welches im Erfolgsfalle nach unserem Ermessen billige Brennstoffzyklen auch bei den genannten kleinen Abbränden garantiert.

Wegen der Forderung nach maximal erreichbarer Schnelligkeit und Billigkeit und wegen der Schwierigkeit, beide Forderungen mit den heute bekannten Aufbereitungsverfahren zu befriedigen, zielt unser Vorschlag für die eigentliche Dekontaminationsstufe in völlig unkonventioneller Weise auf die Anwendung und Erprobung von Diffusions- und Verflüchtigungsprozessen ab. Das Verfahren müßte in vier Stufen durchgeführt werden:

- 1) Nach Herausnahme der kugelförmigen Brennelemente aus dem Reaktor und Abbrandmessung werden die in loser Schüttung in geeignet geformten Spalten derselben vorliegenden Coated Particles durch eine automatische oder halbautomatische Maschine aus den Brennelementen entnommen.
- 2) Die entnommenenen Coated Particles werden in einen Reaktionsofen eingebracht. Hier sollte die Hülle aus pyrolytischem Graphit durch kontrollierte Verbrennung so weit abgetragen werden, daß einerseits der Kern intakt bleibt, andererseits aber die restliche Pyrokohlenstoffschicht durchlässig für die gebildeten Spaltgase wird. Für oxydische Kerne wird man selbstverständlich versuchen, ein solches Verfahren zur Anwendung zu bringen, während dasselbe bei karbidischem Brennstoff - wegen der möglichen Zerstörung der Kerne - eventuell nicht anwendbar ist. Hier kann jedoch versucht werden, die Graphitumhüllungen auf andere Weise zu lösen, z.B. indem man Caesiumdämpfe bei relativ niedrigen Temperaturen auf den Pyrokohlenstoff einwirken läßt. Nach einer ausreichenden Entfernung des Graphits werden die verbleibenden nackten Kerne so lange auf eine Temperatur von ca.  $2000^{\circ}\text{C}$  gebracht, bis die so behandelten Kerne hinreichend dekontaminiert sind.
- 3) Die auf diese Weise gereinigten und damit möglicherweise gesinterten Kerne werden von neuem in bekannter Weise mit einer Graphitumhüllung (Coating) versehen, dann wieder in kugelförmige Brennelemente eingefüllt und in den Reaktor zurückgegeben.

Die hier kurz skizzierten Schritte sowie die ihnen zugrunde liegenden Annahmen und die für ihre Verifizierung erforderlichen Experimente im Rahmen des Brüterprogrammes sollen im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

### III. Begründung des speziellen Vorschlages; Stand der Technik; notwendige Entwicklungsarbeiten zur Realisierung des vorgeschlagenen Verfahrens

#### 1a) Abbranderkennung

In engem Zusammenhang mit der Erlangung maximaler Wirtschaftlichkeit in den Brennstoffkreisläufen steht die Notwendigkeit einer raschen und sicheren Erkennung des Abbrandzustandes eines aus dem Reaktor kommenden Elementes. Es werden hier zur Zeit hauptsächlich zwei Abbrandmeßverfahren untersucht. Das eine Verfahren benutzt einen kleinen kritischen Reaktor, dessen Core von einem Rohr durchquert wird, durch das die zu messende Kugel hindurchrollt. Der sich ergebende prompte Reaktivitätssprung ist ein Maß für den Brennstoffgehalt bzw. für den Abbrandzustand des Elementes [3]. Eine solche Messung würde in Sekundenschnelle durchgeführt sein. Vorversuche ergaben ermutigende Resultate, jedoch laufen systematische Untersuchungen zur Zeit erst an, so daß eine endgültige Aussage noch nicht erlaubt ist. Andererseits wird an der Anwendung eines gammaspektrometrischen Verfahrens zur Erkennung des Abbrandzustandes gearbeitet. Wir gehen dabei von der bekannten Tatsache aus, daß Cs-137 mit 30 Jahren Halbwertszeit und 6,8 % Spaltausbeute ein geeigneter Stoff ist, um aus der Messung seiner Konzentration in einem Gemisch von Spaltprodukten Aussagen über den Abbrandzustand eines Elementes zu gewinnen, vorausgesetzt, daß die Verweilszeit des Elementes im Reaktor klein ist gegenüber der Halbwertszeit des Caesiums (was für den Brüterbetrieb bestimmt gewährleistet ist). Gemessen wird die dem Caesium-137-Barium-137 entsprechende  $\gamma$ -Linie von 0,662 MeV in Gegenwart der  $\gamma$ -Strahlung aller anderen Spaltprodukte. Es ist selbstverständlich, daß für diese Aufgabe ein hochauflösendes  $\gamma$ -Spektrometer erforderlich ist.

Es wurde daher ein Spektrometer, das lithiumgedriftete Germaniumdioden bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffes verwendet, gebaut. Damit gelang es ohne Schwierigkeiten, die Cs-Linie von störenden benachbarten Linien zu trennen (Auflösung besser 5 keV). Die Eichung der Apparatur mit Proben definierten Abbrandzustandes ist vollzogen. Gegenwärtig sind wir in der Lage, in weniger als 3 Minuten eine Angabe über den Abbrandzustand einer Probe nach diesem Verfahren zu machen[14]. Wichtigste Aufgabe im Rahmen der Brüterstudie ist es, diese Apparatur weiter auszubauen und zu automatisieren, damit der Meßvorgang schneller (Größenordnung 30 sec) erfolgt.

Notfalls müssen zwecks Erzielung höherer Durchsatzgeschwindigkeiten mehrere Anlagen der gleichen Art parallel betrieben werden. Nach dieser Abbranderkennung können noch nicht hinreichend abgebrannte Elemente sofort an den Reaktor zurück- und die abgebrannten an das "Head-End" der Aufbereitungsanlage gegeben werden.

1b) Entwicklung geeigneter Brennelemente, in denen die Brennstoffteilchen in loser Schüttung in geeignet geformten Spalten vorliegen.

Die Anwendung des oben skizzierten Verfahrens setzt u.a. voraus, daß Brennelemente mit losen Coated Particles verwendet werden. Die Entwicklung dafür geeigneter Brennelementvarianten ist so weit fortgeschritten, daß mit einiger Sicherheit damit gerechnet werden kann, die geplante Konzeption zu realisieren. Abb. 1 stellt z.B. ein geeignetes mechanisch gedrehtes Brennelement dar. Zwischen der Schale und dem inneren Einsatz der Graphitkugel befindet sich ein Spalt zur Aufnahme der losen Coated Particles. Die Spaltbreite wird nach wärmetechnischen Gesichtspunkten, vor allen Dingen nach der Wärmeleitfähigkeit von losen Partikelschüttungen festgelegt. Nach unseren und an anderen Stellen durchgeführten Experimenten[15] erwarten wir, daß eine maximale Betriebstemperatur von etwa 1400°C für die Partikel zulässig sein dürfte.



Das bedeutet, daß bei einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,04 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$  [16] der Schüttung ein Spalt von  $0,5 \text{ cm}$  Dichte bei einer Leistung pro Flächeneinheit von etwa  $50 \text{ W/cm}^2$  einen Temperaturgradienten von etwa  $300^\circ\text{C}$  in der Partikelschüttung erforderlich macht, um bei einer Gesamtinnenoberfläche des Spaltes von etwa  $50 \text{ cm}^2$  eine maximale Gesamtleistung von  $2,5 \text{ kW}$  zu erzeugen. Da die Anzahl der Kugeln pro  $\text{m}^3$  Reaktorcore etwa  $5600$  beträgt, ist damit eine Leistungsdichte von rund  $14 \text{ MW/m}^3$  zu erreichen, was aber oberhalb des Entwicklungszieles für den Hochtemperatur-Reaktor liegt. Eine Vergrößerung der Brennstoffkerne von bisher etwa  $350 \mu$  auf etwa  $500 \mu$  ermöglichte eine weitere Verbesserung der wärmetechnischen Auslegung durch einen höheren Füllungsgrad des Spaltes. Wie Rechnungen erwiesen haben [17], ist das günstigste Moderationsverhältnis für den Brennstoffkreislauf etwa  $7000$  bis  $8000$ . Unter dieser Bedingung muß eine Graphitkugel von  $6 \text{ cm}$  Durchmesser etwa  $0,4 \text{ g}$  Spaltstoff und infolgedessen bei einem Th/U-Verhältnis von ca.  $30:1$  etwa  $12 \text{ g}$  Thorium enthalten.

In Zusammenarbeit mit einschlägigen Industriefirmen wird daher hier - ausgehend von obengenannten Gesichtspunkten - die Entwicklung eines billigen Brennelementtyps, in dem die Coated Particles in Spalten in loser Schüttung vorliegen, betrieben. Die bisher bei Bestrahlungsversuchen mit solchen Elementen gewonnenen Ergebnisse [3] zeigen, daß ein Zusammenbacken der Teilchen nicht stattfindet, womit wir unsere Absicht begründen, diese durch Anbohren aus den Spalten wiederzugewinnen. Unsere diesbezüglichen Versuchsarbeiten verfolgen verschiedene Richtungen: Es wird das isostatische Preßverfahren geprüft, bei dem miteingepreßte geeignet geformte Wachskörper durch Ausschmelzen die entsprechenden Hohlräume hinterlassen. Ebenso wird mit Stempelpressen und Bleieinsätzen gearbeitet unter gleichzeitiger Erwärmung des Preßlings. Der Bleieinsatz wird ausgeschmolzen und die erwünschten Hohlräume bleiben zurück. Es ist bereits gelungen, nach beiden Methoden Kugeln zu fertigen; die Methoden werden weiter ausgebaut und untersucht.



Im Prinzip würde auch ein Kugeltypus nach Abb. 1 (mechanisch gedrehtes Element) unseren Forderungen entsprechen, jedoch suchen wir nach thermodynamisch günstigeren Spaltformen und auch nach der Möglichkeit, mehr Brennstoff und Brutstoff in einer solchen Kugel unterzubringen als dies in der gezeigten Variante mit den gegebenen Abmessungen möglich ist. In diesem Zusammenhang soll auch erwähnt werden, daß wir im Bestreben, die Brennstoffkreislaufkosten zu senken, an die Verwendung billigerer Graphitsorten denken. Eine solche Verwendung billigeren Graphits könnte aber u.a. zu einer Reduktion der Fallfestigkeit der verwendeten Elemente führen, weshalb bei unseren Studien auch ingenieurtechnisch neue Beschickungsvorgänge untersucht und geplant werden müssen. So wird zur Zeit eine Beschickungsart vom Reflektor her studiert, bei der die Fallhöhe 1 bis 2 Meter maximal betragen würde. Bei einer solchen Beschickungsart vom Rande würde der Kugelhaufen nach der Mitte zu eingebuchtet sein, womit sich auch eine Fluß- und Leistungsabflachung ergibt. Allgemein kann gesagt werden, daß eine solche Begrenzung der Kugelfallhöhe und die damit verbundene Verringerung der notwendigen Fallfestigkeit erhebliche Kosteneinsparungen der Elementherstellung mit sich bringt.

1c) Automat zur Entnahme und Abfüllung von Schalenkörnern aus den Graphitkugeln

Der Verbesserung und Verbilligung des Brennstoffkreislaufes dient auch die Entwicklung einer automatisch arbeitenden Maschine, die die verschlossenen Einfüllstutzen der Kugeln (siehe Abb. 1) erkennt und aufbohrt, die Coated Particles entnimmt sowie die Kugeln neu füllt und verschließt. Diesbezüglich wurden Vorversuche schon angestellt. Es kann dabei notwendig werden, daß das Aufbohren immer exakt an derselben Stelle der Kugeloberfläche vorgenommen werden muß, weshalb ein Suchmechanismus für diesen Zweck entwickelt werden muß. Wir konzentrieren unsere Untersuchungen für diesen Vorgang zur Zeit auf zwei Möglichkeiten, die erste ist im wesentlichen ein mechanischer Abtastmechanismus, die zweite versucht mit Hilfe eines

"γ-Augus" die Kanäle, in denen die Coated Particles liegen, zu erkennen und zur Anbohrung freizugeben. Parallel dazu werden Geräte zum Abfüllen und Verschließen des Elementes entwickelt. Eine solche Vorrichtung, die alle diese Prozesse bis zum fertigen Verschluß des wiederabgefüllten Elementes durchführt, wird zur Zeit im Rahmen der Brüterstudie als Modell erstellt und ist der erste Schritt eines neuen "Head-End-Prozesses". Es ist beabsichtigt, die Graphitelemente mehrmals wiederzuverwenden; wie oft dies möglich sein wird, bestimmen in erster Linie das Korrosions- und Bestrahlungsverhalten der Kugeln im Reaktorbetrieb. Wir erwarten dadurch wesentliche Kosteneinsparungen durch verringerten Bedarf an neuen Graphitkugeln einerseits, sowie durch Reduzierung der Lagerprobleme für bestrahlten Graphit andererseits. Außerdem würde auch eine chemische Wiederaufbereitung weitgehend von den zweifellos störenden Einflüssen des Kohlenstoffs befreit.

Erste Versuchsanlagen für diesen Prozeß wurden bereits soweit erprobt, daß man heute der Überzeugung sein kann, eine befriedigend sicher arbeitende und unaufwendige Maschine für diesen Zweck herstellen zu können [18] .

## 2) Entgiften von abgebrannten Schalenkörnern durch Diffusions- und Abdampfprozesse

Nach neueren Messungen an pyrolytisch beschichteten Brennstoffteilchen diffundiert ein Teil der freien Spaltprodukte \*) [19] selbst durch die Pyrocarbonschicht so stark, daß nach einigen Stunden eine ausreichende Entfernung derselben zu erwarten ist. Wir prüfen aufgrund dieser Ergebnisse zur Zeit sowohl in theoretischen Studien als auch experimentell, ob aus dieser Tatsache nicht Vorteil für eine schnelle und billige Aufbereitung gezogen werden kann. Der vorgelegte Vorschlag zielt darauf ab, die einmal vorhandenen Thorium-Uran-Kerne möglichst häufig zu verwenden. Weil für Spaltedelgase die Hülle aus pyrolytischem Graphit selbst bei diesen hohen Temperaturen noch

---

\*) bei höheren Temperaturen von ca. 2000° C

genügend dicht ist, um einerseits ein Austreten der Gase weitgehend zu verhindern, andererseits aber ein gewisser Teil der Partikel durch den Spaltgasdruck gesprengt wird - wobei auch der zu erhaltende Kern in Mitleidenschaft gezogen werden kann - ist die Entfernung dieser Hülle unbedingt erforderlich. Damit verbunden ist natürlich schon eine teilweise Entgiftung, weil alle im Coating enthaltenen Gifte mitentfernt werden; weiter erwarten wir vom freien Kern dann eine noch bessere Fähigkeit zur Freisetzung von Spaltprodukten.

## 2a) Abtragen der Hülle von den Brennstoffschalenkörnern

Das Abtragen der Hüllen aus pyrolytischem Kohlenstoff ohne Zerstörung der Kerne könnte nun ein Problem für den Fall der Verwendung karbidischer Kerne darstellen, während man beim Vorliegen von oxydischen Brennstoffkernen ohne weiteres an ein Abbrennen der PyC-Schalen denken kann. Voraussetzung einer kontrollierten Schichtabtragung im Falle der Karbide ist eine möglichst vollkommene Kugelgestalt und gleichmäßige Dicke der Umschichtung. Ein Abtragen der Umschichtung aus PyC ohne Angriff des Kernmaterials scheint bei oxydischen und karbidischen Brennstoffen möglich zu sein. Während sich ein Th-/U-oxyd mit einem Urangehalt kleiner 10% ohne weiteres in einer oxydierenden Atmosphäre stabil verhält, wird ein karbidischer Brennstoff nach Abbrennen der Umschichtung selbst angegriffen werden, d.h. selbst verbrennen. In diesem Fall ist ein kontrolliertes Schichtabbrennen bis auf eine dünne pyrolytische Restschicht angebracht, so daß auch die weniger stabilen Spaltproduktkarbide herausdiffundieren können, wobei der Kern durch die Restumschichtung vor dem Abbrennen geschützt bleibt. Da aber unter Umständen auch an die Verwendung karbidischen Brennstoffs gedacht ist - nämlich dann, wenn solche Kerne eine leichtere Entgiftung durch Diffusions- und Abdampfprozesse erlauben (worauf weiter unten eingegangen werden soll) - so kann die Abbrennung der Schale in einem solchen Fall mit großen Schwierigkeiten verbunden sein.

Für diesen Fall muß untersucht werden, ob nicht die Hülle auch so weit abgebrannt werden kann, daß gerade die gasförmigen Spaltprodukte frei werden, jedoch der Kern nicht merkbar angegriffen wird. Da ein solcher Prozeß gleichmäßig stattfinden muß, ist hier das Vorliegen vollkommen runder Kerne mit gleichmäßiger PyC-Schicht Bedingung.

Eine weitere mögliche Methode der Umschichtungsentfernung ist die Behandlung der Schalenteilchen mit Alkalimetalldämpfen. In einigen Versuchen wurde beobachtet, daß sowohl Graphit als auch PyC bei Einwirken von Caesium in Pulver zerfallen. Sollte diese Reaktion für unsere Zwecke zufriedenstellend verlaufen, so könnte man daran denken, mit ihrer Hilfe die Pyrokohlenstoffschicht zu entfernen. Der Angriff der Alkali-Metalle auf die Partikel selbst ist zum heutigen Zeitpunkt noch nicht ausreichend bekannt. Alle genannten Methoden befinden sich noch im Stadium der Erprobung und endgültige Aussagen über ihre Eignung lassen sich noch nicht machen. Daneben wird selbstverständlich auch nach anderen geeigneten Verfahren zur Entfernung der Kohlenstoffhülle gesucht. Zur Zeit werden die aufgeworfenen Fragen in einem umfangreichen Versuchsprogramm geklärt.

## 2b) Die Dekontamination durch Diffusions- und Abdampfprozesse

Für eine ausreichende Dekontamination der Partikel gehen wir jetzt von der Annahme aus, daß die Entfernung der PyC-Hülle gelungen ist, die Kerne also nackt vorliegen. Bei einer Temperatur von  $2000^{\circ}\text{C}$  und höher ist jetzt eine wesentliche Spaltproduktfreisetzung zu erwarten. Die freiwerdenden Spaltprodukte werden durch geeignete Maßnahmen abgeführt und an eine geeignete "waste-Vorrichtung" gegeben. Das Diffusionsvermögen von Spaltprodukten in oxydischem Brennstoff wird mutmaßlich ein anderes sein als in karbidischem Brennstoff. Im karbidischen Brennstoff, der freien Kohlenstoff enthält, können die Spaltprodukte besonders bei hohen Temperaturen stabile Karbide bilden, und diese können in einem Karbid oder in einem Kohlenstoffgitter zurückgehalten und daher möglicherweise schlecht entfernt werden. Es sind für die in



Betracht kommenden Temperaturen die "freien Energien" für die Bildung der Spaltproduktkarbide rechnerisch bestimmt worden [20]. Dabei zeigte sich, daß die Bildung der Karbide von Yttrium, Zirkonium, Molybdän, Hafnium, Niob, Lanthan, Cer und Praseodym wahrscheinlich ist. Auch Erdalkalimetalle und selbst Edelmetalle können bei ausreichend hohen Temperaturen Karbide bilden (Strontium, Barium, Ruthenium, Thorium und Palladium); da aber die freie Bildungsenergie für diese Karbide einen kleinen negativen Wert hat, kann trotzdem angenommen werden, daß ihre Wanderung im Karbid oder im Kohlenstoffgitter möglich ist.

Es sind weiter Messungen bekannt geworden [21] über die Diffusion von Lanthaniden und Aktiniden in Graphit bei 1600 bis 2000° C, die beweisen, daß eine Beziehung besteht zwischen den beobachteten Diffusionsraten und den Siedepunkten der betreffenden Stoffe, d.h. je niedriger der Siedepunkt, desto besser das Diffusionsverhalten. Einige Spaltprodukte bilden keine stabilen Karbide und können wahrscheinlich leicht verflüchtigt werden. Diese sind z.B. Selen, Krypton, Xenon, Rubidium, Arsen, Cadmium, Caesium, Zink, Tellur, Strontium, Antimon und Barium.

Weiter ist aufgrund unserer bisherigen Bestrahlungsergebnisse sowie aufgrund derer von anderen Gruppen seit längerem bekannt, daß bei höheren Temperaturen z.B. Brom, Selen, Krypton, Rubidium, Strontium, Silber, Cadmium, Indium, Tellur, Jod, Xenon, Caesium und Barium in Graphit ein ausgezeichnetes Diffusionsvermögen besitzen. Jüngst veröffentlichte Messungen von Oak Ridge [22] zeigen, daß Jod und Caesium selbst durch pyrolytischen Kohlenstoff hindurch bei höheren Temperaturen ein beachtliches Diffusionsvermögen haben. Weil es in diesem Zusammenhang von Interesse ist, mögen aus dem zitierten Bericht einige Werte angegeben sein, die die stündlichen Abdampfraten verschiedener Spaltprodukte betreffen. Man sieht, daß selbst mit Hülle bei höheren Temperaturen beachtliche Dekontaminationen erreicht werden können. Tabelle III (siehe auch Abb. 2)

Die erreichbaren Spaltproduktfreisetzungsraten am Beispiel von Ba und Sr. Dargestellt ist die Gesamtfreisetzung beider Spaltprodukte in % der ursprünglich vorhandenen Menge in Abhängigkeit von der Ausheizzeit. Die Pyrocarbonschicht wurde bei diesem Ausheizexperiment nicht entfernt. Ausheiztemperatur 2000°C. Die Werte sind entnommen von Scott 19

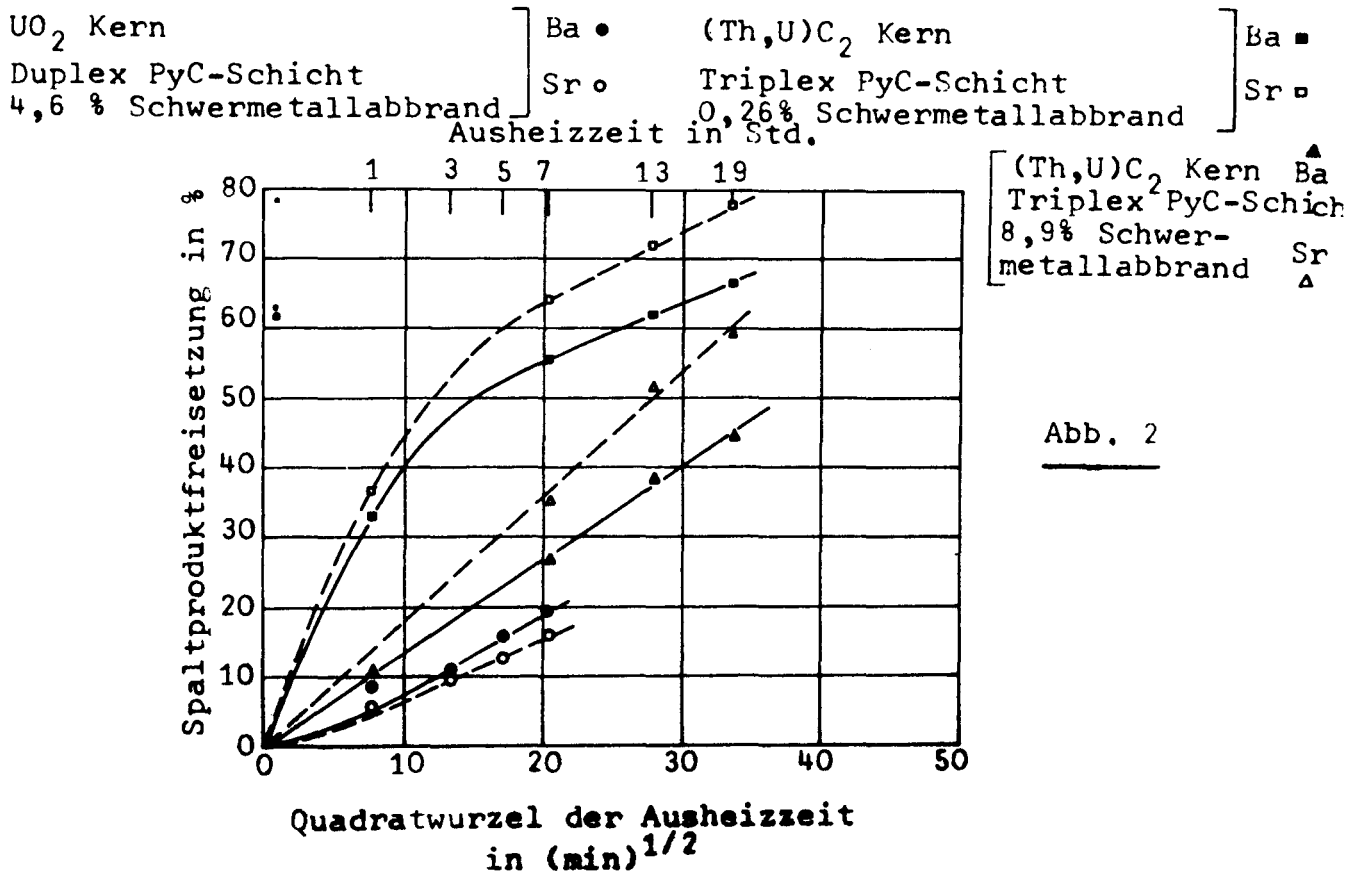


Abb. 2

T a b e l l e    III

Freisetzungsraten verschiedener Spaltprodukte aus pyrolytisch beschichteten Brennstoffteilchen während eines Ausheizexperiments bei 2000° C (Entnommen aus [19] ).

Kern	PyC-Typ	Abbrand % Schwer- metall	Spaltproduktfreisetzungsraten % Std.				
			140 Ba	89 Sr	144 Ce	137 Cs	91 Y
UO <sub>2</sub>	Duplex	4,6	2,0	2,0	0,03	≤ 0,2	--
(Th,U)C <sub>2</sub>	Triplex	0,29	6,0	7,0	5,0	0,3	--
(Th,U)C <sub>2</sub>	Triplex	8,9	3,0	5,0	3,0	1,0	3,0
UO <sub>2</sub>	Duplex	14,7	10,0	7,0	0,005	7,0	0,01

Aufgrund des vorliegenden Datenmaterials kommen wir zu dem Schluß, daß beim Vorliegen von karbidischem Brennstoff im wesentlichen die Elemente Zirkonium, Neodym, Molybdän, Tellur, Praseodym, Promethium, Uran, Thorium und Protactinium nicht abdampfbar sind, wobei das im Falle der drei letztgenannten einen Vorteil bedeutet. Die verbleibenden Spaltprodukte Zirkon, Molybdän und Technetium sind in Form von Karbiden sehr stabil und können durch den angegebenen Prozeß wahrscheinlich nicht entfernt werden [23] . Sie spielen aber - wie später gezeigt wird - für die Neutronenbilanz eine so geringe Rolle, daß auf ihre Beseitigung wahrscheinlich verzichtet werden kann. Das Diffusionsverhalten der anderen, wie z.B. Neodym, Praseodym, Promethium und insbesondere von Protactinium soll in Versuchen, die wir in diesem Zusammenhang anstellen, geklärt werden.

Möglicherweise können diese Spaltprodukte aber bei einer Transmutation des karbidischen Kerns in die oxydische Form ohne Zerstörung des Kerns als Oxyde ausgetrieben werden, da die Oxyde derselben flüchtig sind. Für oxydisches Material sind - ähnlich wie für karbidisches - für die in Betracht kommenden Temperaturen die freien Energien für die Bildung von Spaltproduktoxyden bestimmt worden. Dabei zeigte sich, daß Zirkonoxyd, Bariumoxyd, Yttriumoxyd und Strontiumoxyd sowie alle Lanthaniden und Aktiniden vermutlich nur begrenzt verdampfbar sind. Messungen, die Morgan [19] in Oak Ridge über das Rückhaltevermögen von Brennstoff mit oxydischen Kernen gemacht hat, stehen jedoch teilweise mit den aufgrund thermodynamischer Berechnungen gewonnenen Aussagen im Widerspruch. Es wird deshalb auch hier notwendig sein, genauere Untersuchungen anzustellen und dies auch wieder im Hinblick auf Protactinium und die anderen Aktiniden. Um einen Überblick über die Wichtigkeit der verschiedenen Spaltprodukte und damit einen Hinweis auf die Notwendigkeit des Grades ihrer erforderlichen Entfernung aus den Kernen zu bekommen, mag die folgende Abbildung dienen.

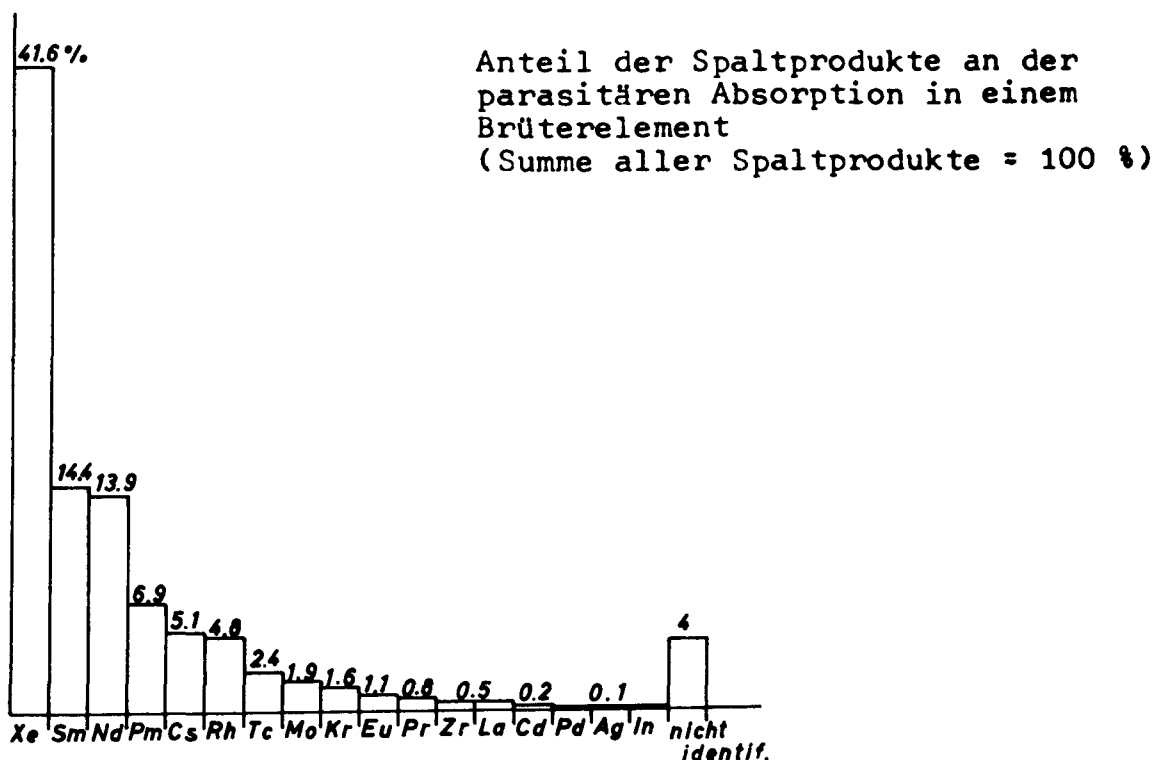


Abb. 3

### 3) Neubeschichten der gereinigten Partikel

Die in einem Reaktionsofen gereinigten und eventuell gesinterten Thorium-Urankarbid-Partikel werden in das bekannte Wirbelbett zur Herstellung von neuen Graphitumhüllungen eingebracht. Die Aufbringung der "Coatings" erfolgt in der heute bekannten Weise. In diesem Zusammenhang darf noch darauf hingewiesen werden, daß bei den hier angesetzten relativ geringen Abbränden von 20 000 bis 30 000 MWd/to an die Qualität der Graphitumhüllungen wahrscheinlich keine so hohen Anforderungen gestellt werden wie sie bei beträchtlich höheren Abbränden offenbar erforderlich sind. Ein Verfahren der beschriebenen Art würde es wahrscheinlich gestatten, auch bei thermischen Uran-Thorium-Systemen zum Brüten bei gleichzeitig sehr billigen Stromgestehungskosten zu kommen. Es würde den Brennstoffkreislauf eines THTR-Reaktors in ähnlicher Weise schließen helfen wie die für die kontinuierliche Aufbereitung von homogenen zirkulierenden Systemen vorgeschlagenen Verfahren.

### IV. Weitere Verbesserungsmöglichkeiten für die Neutronenökonomie durch die Verwendung von Berylliumoxyd

Die in Tabelle I und II angegebenen Werte für die möglichen Brutfaktoren und Verdopplungszeiten bei Verwendung von Berylliumoxyd lassen klar die nuklearen Vorteile erkennen, die damit verbunden sind. Wir denken daher daran, vorerst einen Teil der Graphitelemente durch solche aus Berylliumoxyd zu ersetzen. Da die Verwendung von Berylliummetall in Hochtemperatur-Reaktoren wegen der schlechten Bestrahlungseigenschaften und wegen des relativ niedrigen Schmelzpunktes wohl kaum in Betracht kommen dürfte, haben wir bisher nur die Verwendung von BeO-Keramik ins Auge gefaßt. In dieser Absicht werden wir bestärkt durch das bekannt gute Bestrahlungsverhalten von Berylliumoxyd bei hohen Temperaturen [24]. Andererseits ist bekannt, daß bei den hier diskutierten Leistungen pro Kugel Festigkeitsprobleme - bedingt durch

Wärmespannungen - den Einsatz von völlig aus BeO bestehenden Elementen, in denen der Brennstoff in Form von losen Coated Particles vorliegt, erschweren [25]. Auch wird es aller Voraussicht nach notwendig werden, beim Einsatz solcher BeO-Vollelemente die Beschickungsanlage des Reaktors konstruktiv so auszulegen, daß Fallhöhen von ca. 2 Meter nicht überschritten werden. Es lassen sich nun verschiedene Möglichkeiten für den Einsatz von Berylliumoxyd in einem Kugelhaufen-Reaktor diskutieren. Die wohl konventionellste Art und damit wohl auch der am ehesten begehbare Weg wäre die Beimengung eines gewissen Prozentsatzes von kompakten Berylliumoxydkugeln (ohne Brennstoff-Füllung) zu den oben beschriebenen Graphit-Brennelementen. Andererseits erscheint es aber auch möglich und von Vorteil, Kugeln mit einem BeO-Kern, der von einer äußeren Graphitschale umgeben ist - wobei die Coated Particles zwischen Kern und äußerer Graphitschale in loser Schüttung untergebracht sind - anzuordnen. Eine solche Kugel könnte im übrigen der in Abb. 1 gezeigten entsprechen. Schließlich kann man auch an die Anwendung nur aus BeO bestehender Kugeln denken, die - ähnlich den oben besprochenen Graphitelementen - die "Coated Particles" in eingepreßten Hohlräumen (Spalten) in loser Schüttung enthalten. Die letztgenannte Variante ist wohl die futuristischste aus oben erläuterten Gründen. Selbstverständlich sind im Zusammenhang mit der gemeinsamen Verwendung von BeO und Graphit bei hohen Temperaturen auch noch Kompatibilitätsfragen zu untersuchen. Solche Untersuchungen, sowie nukleare Untersuchungen an Beryllium und Berylliumoxyd werden im Rahmen der Brüterstudie für den gasgekühlten Hochtemperatur-Reaktor einen wesentlichen Platz einnehmen. Es besteht nämlich weiter die dringende Notwendigkeit, um zu genauen theoretischen Vorhersagen über die maximal erreichbaren Brutraten unter Verwendung von BeO zu kommen, durch Messungen die Größe des Schnellspaltfaktors sicherzustellen. Wir haben dazu verschiedene Experimente im Rahmen der Brüterstudie begonnen, die nicht nur für uns, sondern auch allgemein von Interesse für die Reaktorphysik sind [26]. So werden zur Zeit verschiedene Versuche zur Bestimmung des Schnellspaltfaktors für Beryllium und Berylliumoxyd durchgeführt. Es wird einmal mit Hilfe eines Bündels thermischer Reaktorneutronen eine Urankonverterfolie bestrahlt, die in



der Mitte einer Berylliumoxyd- oder Graphitkugel variabler Dimensionen angebracht ist. Die erzeugten schnellen Neutronen werden mit Hilfe der  $\text{MnSO}_4$ -Bad-Technik nachgewiesen. Das Verhältnis der Aktivierungen mit Berylliumoxyd zur Aktivierung der Graphitkugeln ergibt direkt ein Maß für den Schnellspaltfaktor. Weiter wird mit geringen Abwandlungen - bedingt durch die Verwendung eines starken Neutronengenerators, dessen Neutronen erst thermalisiert werden müssen - im wesentlichen die Messung von Zhezherun [11] wiederholt. Ein drittes unabhängiges Experiment verwendet die experimentellen Einrichtungen, wie sie normalerweise zu  $v$ -Messungen verwendet werden, also einen Liquidszintillatortank in Kombination mit schneller Elektronik [27]. Bei all diesen Experimenten wird das notwendige Spaltspektrum durch Konverterfolien im Innern der Meßkugel erzeugt. Der Schnellspaltfaktor ergibt sich jeweils aus dem Verhältnis der gemessenen Zählraten einmal unter Verwendung einer Beryllium(oxyd)- und einmal unter Verwendung einer Graphitkugel. Die Messungen sind anderweitig [26] beschrieben worden, weshalb hier auf eingehendere Wiedergabe verzichtet wird. Eine weitere Arbeit, die uns bessere über das Spaltspektrum gemittelte Wirkungsquerschnitte für die  $(n,2n)$ -Reaktion des Berylliums liefern soll, geht von der Bestrahlung metallischer Berylliumproben im schnellen Fluß (im Brennelement) eines Reaktors aus. Aufgrund einer volumetrischen Bestimmung der gebildeten Heliummenge ( $\text{Be}^9(n,2n)\text{Be}^8 \rightarrow 2 \text{He}^4$ ) und bei Kenntnis der schnellen Dosis kann ein über das Spaltspektrum gemittelter Wirkungsquerschnitt bestimmt werden [28]. Diese Messungen werden zur Kontrolle ähnlicher in der Literatur [29] angegebener Werte durchgeführt. Sie dienen uns überdies aber auch zur Kontrolle der Freisetzungsrates des durch Bestrahlung gebildeten Heliums in  $\text{BeO}$  oder  $\text{Be}$  bei Erwärmung. Parallel zu der für die Neutronenökonomie eines Reaktors günstigen  $n,2n$ -Reaktion in Beryllium verläuft nun allerdings mit bedeutend kleinerer Wahrscheinlichkeit eine  $n,\alpha$ -Reaktion, die über  $\text{He}^6$  zu  $\text{Li}^6$  führt.  $\text{Li}^6$  ist mit 950 barn ein starkes Neutronengift und macht damit einen Teil der Gewinne durch die  $n,2n$ -Reaktion zunichte. Eine kontinuierliche Beseitigung des anfallenden  $\text{Li}^6$  wäre von Vorteil.

Es sind nun in der letzten Zeit Messungen über die Diffusion von  $\text{Li}^6$  in  $\text{BeO}$  bekannt geworden [30], die die Vermutung nahelegen, daß bei höheren Temperaturen - wie sie im Hochtemperatur-Reaktor herrschen - ein erheblicher Prozentsatz des gebildeten  $\text{Li}^6$  aus der  $\text{BeO}$ -Schale diffundiert und in den Gaskreislauf sowie schließlich in die Gasreinigungsanlage eintritt.

Um quantitative Aussagen über diesen für die Brutrate günstigen Effekt machen zu können, werden zur Zeit auch Versuche zur Klärung der Diffusion von  $\text{Li}^6$  im  $\text{BeO}$  bei höheren Temperaturen ausgeführt. Vorläufige Ergebnisse weisen in die gleiche Richtung wie die zitierten amerikanischen Messungen.

Im Rahmen der beschriebenen Entwicklungsarbeiten für den Hochtemperatur-Thoriumbrüter wird zunächst angestrebt, etwa die Hälfte des Moderatorvolumens durch  $\text{BeO}$  zu gestalten bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistungsdichte.

#### 7. Schlußbemerkung

Die aus einem bestrahlten Element wiedergewonnenen Coated Particles können selbstverständlich auch statt mit der geschilderten futuristischen Aufbereitungsmethode mit Hilfe konventioneller Methoden aufbereitet werden. Ein umfangreiches Versuchsprogramm auch über nasse und andere trockene Aufbereitungsverfahren wurde inzwischen von der KFA Jülich in Zusammenarbeit mit der einschlägigen Industrie in Angriff genommen. Hier soll darauf nicht eingegangen werden, sondern vielmehr war es die Absicht, über einige neuartige Vorhaben zu berichten. Alle genannten Arbeiten laufen zur Zeit erst an, weshalb hier versucht wurde, mehr die Zielsetzung herauszuarbeiten sowie die Begründung für unser Vorgehen zu schildern, als detailliert die Durchführung einzelner Versuche zu beschreiben. Neben den genannten Untersuchungen laufen selbstverständlich Reaktorberechnungen, in denen natürlich besonders die wirtschaftliche Seite der Verwendung von  $\text{BeO}$  untersucht wird. Daneben wird es notwendig werden, für die genannten neuartigen Aufbereitungsprozesse auch umfangreiche Ingenieurstudien, die notwendigen Anlagen betreffend, durchzuführen, sobald die Grundlagen-

untersuchungen praktische Wege für die Durchführbarkeit des Vorschlages aufgezeigt haben. Die genannten Arbeiten können mit einem im Vergleich zu anderen Projekten geringen Kostenaufwand einen wesentlichen Beitrag für die bessere Ausnutzung des Thoriumkreislaufes ergeben und helfen darüber hinaus, die Hochtemperaturreaktorlinie weiterzuentwickeln. Sie erscheinen sehr sinnvoll, wenn man bedenkt, daß es sich hier um die konsequente Weiterentwicklung einer bereits bestehenden Linie handelt.

## L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

- 1 W. Oldekop Atomwirtschaft, Heft 6, S.316-317  
1966
- 2 P.M. Moretti und R. Schmidt Atomwirtschaft, Heft 6, S. 319-320  
(1966)
- 3 THTR SR 1  
THTR, Thorium-Hochtemperatur-Projekt  
Status-Report 1965 THTR 4  
Europäische Atomgemeinschaft, Brown  
Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH, Kern-  
forschungsanlage Jülich des Landes  
Nordrhein-Westfalen e.V.
- 4 R. Schulten et al Der Hochtemperatur-Reaktor von BBC-  
Krupp  
Die Atomwirtschaft, Heft 9 1959
- 5 R. Schulten Atomwirtschaft, Heft 6, S. 318-319  
(1966)
- 6 I.A. Lane The Economic Incentive for Thorium  
Reactor Development  
ORNL-TM 1147 (1965)
- 7 K. Wagemann Zukünftiger Brennstoffbedarf von  
Atomkraftwerken  
Institut für Reaktorentwicklung der  
KFA Jülich, Interner Bericht  
Januar 1965
- 8 G.A. - 4706 März 1964  
General Atomic Division of General  
Dynamics Corp. Design Study Report for  
Target A 1000 MWe High Temperature  
Gas Cooled Reactor  
USAEC-Report
- 9 W.H. Roberts J. of Nuc Materials 14, 29-40 (1964)
- 10 W. Häfele ORNL-2779 (1959)
- 11 J.F. Zhezherun Atomnaya Energya Vol. 15  
et al Nr. 6 (1963)
- 12 A.J. Goodjohn and The Use of BeO in Advanced Reactor  
H.B. Stewart Concepts Journal of Nuclear Materials  
14 (1964) 19-28

- 13 R.C. Briant  
A.M. Weinberg Nuc Sci Eng 2, 797, 1957
- 14 H. Bükér Die Messung des Abbrandzustandes kugelförmiger Brennelemente mit Hilfe eines hochauflösenden Halbleitergammaskpektrometers. Diss. Th, Aachen (1966)
- 15 (siehe 19 , Seite 94)
- 16 G.A. 5886 Quarterly Progress Report  
30. Nov. 1964
- 17 S. Brandes Minimal Fuel Cycle Costs for a 1000 MW<sub>el</sub> High-Temperature Reactor with Two-Type Loading  
IRG-65-42 Interner Bericht
- 18 K.W. Baurmann  
K.H. Hammelmann  
W. Tschakert Verfahren zum automatischen Austausch von Schalenteilchen bei kugelförmigen Brennelementen  
Jül-378-RG April 1966
- 19 J.L. Scott ORNL-Contribution  
Vortrag anlässlich des "Ceramic Meeting" Brüssel 28.1. - 2.3.1966
- 20 J. Bromley AERE R. 4004
- 21 C.J. Orth Nuc. Sci Eng. 9, 1417 (1961)
- 22 (siehe 19 , Seite 103 und 104)
- 23 L. Podo Interner Bericht IRG-17-66 April 1966  
Interner Bericht IRG-14-66 Februar 1966
- 24 G.A. Report 4643 Okt. 1963
- 25 V. Galikine Interner Bericht IRG-13-66 April 1966
- 26 R.Hecker  
P.H. Heckmann  
N. Kirch Über einige Methoden zur experimentellen Bestimmung des Schnellspaltfaktors von Berylliummetall und Berylliumoxyd  
Jül-337-RG November 1965
- 27 J.C. Hopkins and  
B.C. Diven Nucl. Sci Eng. Vol 12, Nr. 2 (1962)
- 28 K.H. Robrock  
R. Hecker Bestrahlung von Be-Metall oder BeO in einem Leistungsreaktor zur Bestimmung des Wirkungsintegrals RG-65-21  
Institut für Reaktorentwicklung der KFA Jülich, Interner Bericht

- 29      W. Felber et al      PWAC-433, May 1964
- 30      L.J. Stieglitz      The High-Temperature Behavior of  $\text{Li}^6$   
         L.R. Zumwaldt      in BeO Moderator Material  
         (G.A.)      Trans. Am Nuc Soc. 1965, Band 8, Nr. 1